

ソフトスイッチング特性を改善した非共振形高周波リンクコンバータ

松井 幹彦*¹ 関根 義一*²

Nonresonant HF Link Converter with Improved Soft-Switching Characteristics

Mikihiko MATSUI Yoshikazu SEKINE

Abstract: For the purpose of making operating frequency higher to deduce the dimensions and weight of a power converter and its EMI(Electro-Magnetic Interference) problems, so-called soft-switching has become a far more important technique today. There exists typical two ways of approaches toward the ideal soft-switching circuit topologies. One is based on nonresonant converter techniques. The authors previously proposed a novel totally soft-switched high frequency converter from nonresonant approach. However, there remained a problem of undesirable effect due to parasitic diode in each bidirectional switching arm on its soft-switching characteristics. This effect is remarkable especially in the case of using MOS-FETs. This paper presents an improved arm topology to prevent such undesirable effect, and confirms total soft-switching operation by an experimental manner.

1. まえがき

電源装置の小形軽量化の要求から、スイッチングパワーコンバータの動作周波数は近年一層高周波化される傾向にある。また、インバータを用いた蛍光灯やエアコン、太陽光発電システムなどのパワーエレクトロニクス機器が一般家庭に普及するにつれて、機器の発生する高調波や電磁波ノイズの問題、いわゆるEMI（電磁妨害）問題も一層身近になってきている。コンバータの半導体デバイスにおけるスイッチング損失を低減し、かつ放射ノイズを抑制する手段として、コンバータをZVS（零電圧スイッチング）やZCS（零電流スイッチング）モードで動作させるソフトスイッチング方式の共振形コンバータの研究がここ数年来盛んに行われてきた⁽¹⁾。

いわゆる共振形と呼ばれる回路方式では、周知のように共振電圧や共振電流のピーク値が大きくなるため、非共振形に比べてデバイスの負担が増し、その結果、パワーコンバータの利用率が悪化するという欠点がある。このことから、最近の研究開発の主流は共振形からアクティブクランプ技術の適用や部分共振形にシフトしている⁽²⁾⁽³⁾。

図1は、非共振形のハードスイッチングコンバータを出発点として、理想的なソフトスイッチング回路方式に至る2つの道筋を示したものである。左側のアプローチ1は非共振形回路を基本とし、これにスイッチング特性を改善するためのスナバ回路を付加しロスレス（無損失）タイプへと改良していく方法である。一方、右側のアプローチ2は、共振形回路技術に基づく方法である。先に述べた通り、研究の主流は既にアクティブクランプや部分共振形に移

行しており、その中には「ソフトスイッチングPWM」や「共振ボール形」と呼ばれる方式が含まれる。これら2つのアプローチの方法は、スタートにおいては全く別の方法のように思われるが、行き着く先においては極めて類似した回路方式を生み出していることに気が付く。例えば、アプローチ2の側で一般に「ソフトスイッチングPWM」と呼ばれる回路方式は、アプローチ1側ではしばしば「共振スナバ付き方式」と呼ばれる⁽²⁾。このことは、ひとたび非共振形を離れ共振形のアイデアを取り入れた方式が、再び非共振形の利点を取り入れていると見ることもでき興味深い。従って、回路構成のシンプルさを特徴とする非共振形コンバータに必要最小限の回路要素を付加することで共振形と同様のソフトスイッ

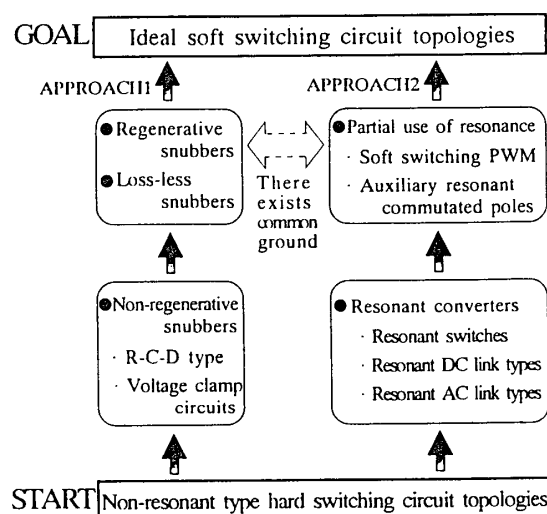


Fig.1 Typical two ways of approach toward ideal soft switching circuit topologies.

*¹ 本学電子工学科 助教授

*² 本学電子工学科平成8年卒
1996年10月3日 受理

ング特性を実現できるならば、大変魅力ある方式となる可能性がある。

このような考えに基づいて、筆者らは1992年以来、アプローチ1側から検討を行い、非共振形の高周波リンクコンバータのソフトスイッチング化の手法を提案してきた⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。しかしながら、この方式ではサイクロコンバータ段を構成するのに双方向性のスイッチが必要であり、これを実現する際にデバイスのリカバリ特性が悪いとソフトスイッチング波形を乱してしまう問題がある。とりわけこの現象は主デバイスとして内部に寄生ダイオードを備えたパワーMOS-FETモジュールを用いた場合に顕著となる。

本稿では、双方向性スイッチのリカバリ電流の経路を明らかにし、寄生ダイオードの悪影響を受けないスイッチの構成法を提案しその効果を実証する。

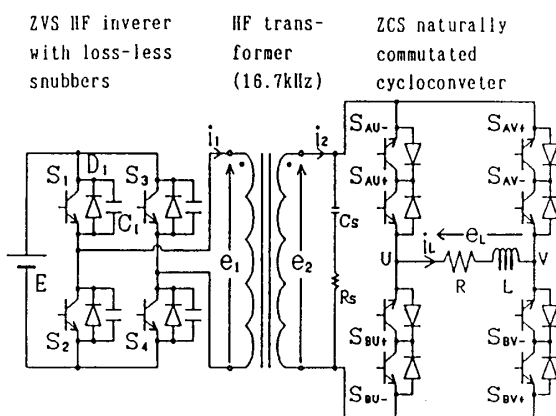


Fig. 2 Proposed soft-switched non-resonant type HF link DC/AC converter with cycloconverter output stage.

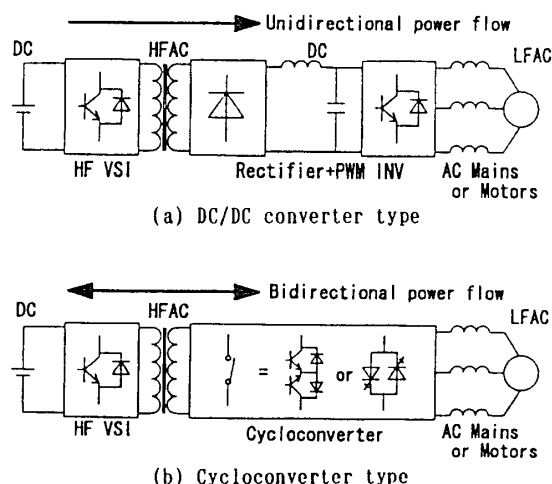


Fig. 3 Typical two types of HF link DC/AC converters.

2. 基本回路の動作原理

スイッチの構成法に先立って、はじめに図2に示す最も基本的な単相出力の回路に基づいて、提案方式の基本動作原理を述べる。

2.1 単相出力の基本回路方式

図2の主回路方式は、いわゆるサイクロコンバータ方式と呼ばれるDC/ACコンバータである。トランス左側の1次側には電圧形のHFインバータが接続される。インバータの各アームにロスレススナバキャパシタを接続することによって、遅れ電流負荷に対して常にZVSモードでの動作が可能となる。ここで2次側のサイクロコンバータ段を遅れ電流源として動作させるために、提案方式ではサイクロコンバータの制御法として一般に用いられるPWMを用いずに他励サイリスタコンバータで用いられる位相制御の原理に基づいて出力電圧の制御を行う。すると、サイクロコンバータ段自身も自然転流の転流重なり現象によってZCSモードで動作する事になり、インバータ段のZVS動作と併せて原理的に全てのスイッチング動作をソフトスイッチング化できる。

図3は、このサイクロコンバータ方式の特徴を明らかにするため、もう一方の回路方式であるDC/DCコンバータ方式と比較して示したものである。前者の利点は、電力フローが双方向である点にある。従ってこの方式はバッテリーによるエネルギー蓄積機能を備えた太陽光発電システムやエネルギー回生機能を備えたUPS等の用途に適用できる。

2.2 制御信号タイミング

図4にインバータおよびサイクロコンバータ段の制御信号タイミングを示す。両者ともに同一の基準発振器に同期して制御される。インバータ段に対しては、上下アームの短絡を防ぐためにデッドタイム τ_d が設定される。一方サイクロコンバータ段では、自然転流のみを利用するため、上下アームの転流重なりを許容するための重なり時間 τ_o が設けられる。また、位相制御タイミングは基準のこぎり波と電圧指令との比較により決定される。出力電流指令の極性に従い+または-のいずれかのグループのデバイスに信号が送られる。

2.3 双対原理に基づくソフトスイッチングメカニズム

図5は、制御信号タイミングおよびこれに対応するトランスの1次側、2次側の動作波形である。ただし、ここでは理解を容易にする目的で τ_d と τ_o の

時定数を誇張して示してある。これらの期間内での転流動作を更に詳しく示したのが図6である。期間 τ_d 内では、インバータのレッグの上下アームは共にオフ状態となる。このため負荷電流は図6(a)に示されるように4つのロスレススナバを流れる。その結果、これからオンしようとするアームの電圧はEか

ら0へ、またオフしようとするアームの電圧は0からEへと台形状に変化する。このようにして、1次側のインバータ段でのZVSオンおよびオフ動作が行われる。

一方、期間 τ_o 内ではサイクロコンバータ段においていわゆる転流重なり現象が起きる。この期間では上下アームは図6(b)に示されるように共にオン状態にあり、これからオンしようとするアームの電流は0から I_o へ、またオフしようとするアームの電流は I_o から0へと台形状に変化する。このようにして、2次側サイクロコンバータ段でのZCSオンおよびオフ動作が行われる。

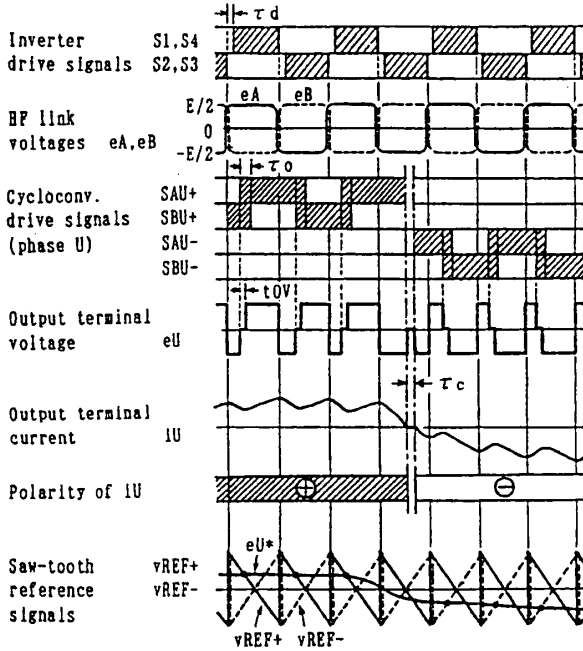


Fig.4 Control signal timings for the proposed scheme.

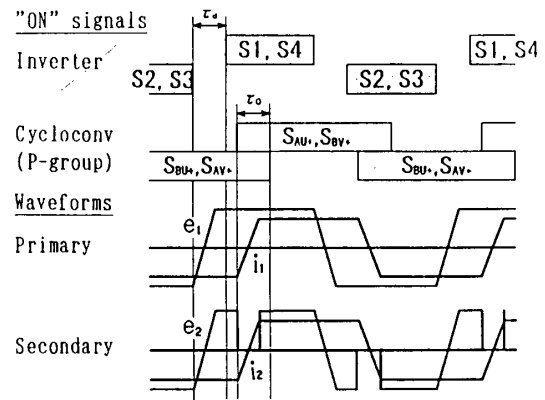


Fig.5 Control signal timings and idealized waveforms at primary and secondary transformer terminals.

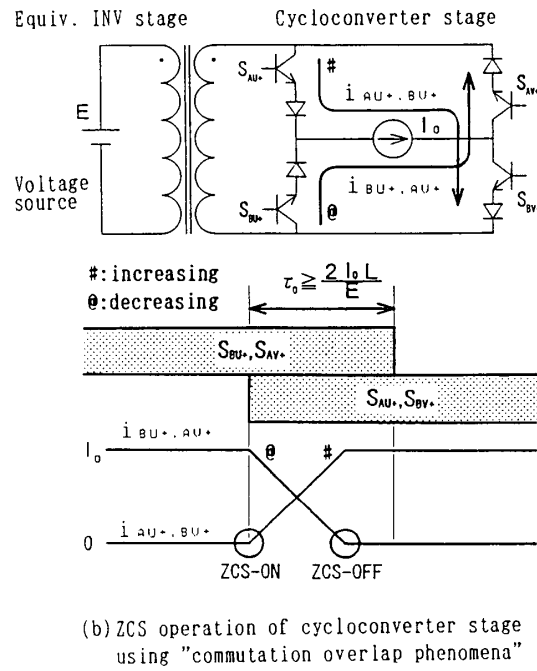
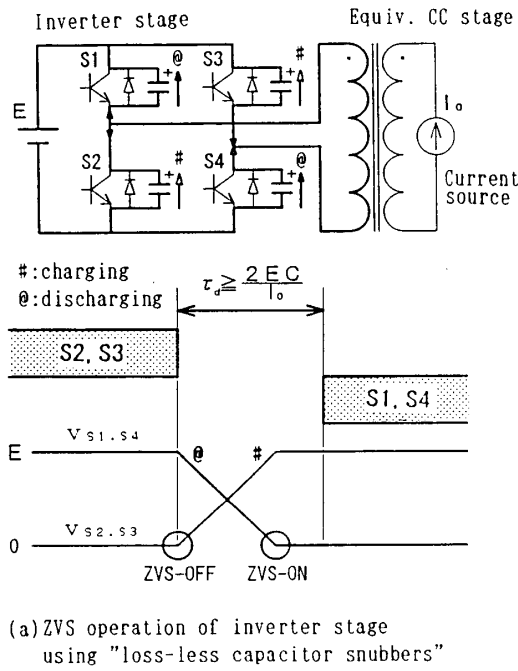


Fig.6 Principles of non-resonant soft-switching operations.

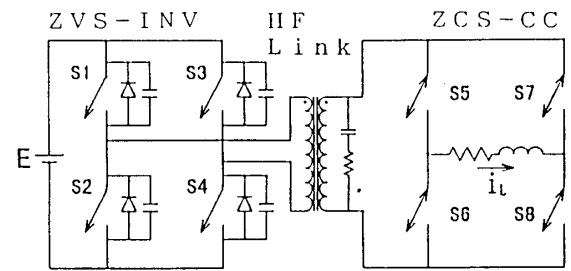
以上に述べた1次側、2次側での転流動作のメカニズムは、互いに双対の関係にある。この関係を詳しく比較したものを表1に示す。この様に、相互に双対な現象を組み合わせる点がこの方式の特徴である。表2は、個々のスイッチングがZVS、ZCSのいずれに属するのかを示したものである。

3. MOS-FETモジュールを用いたZCSアーム

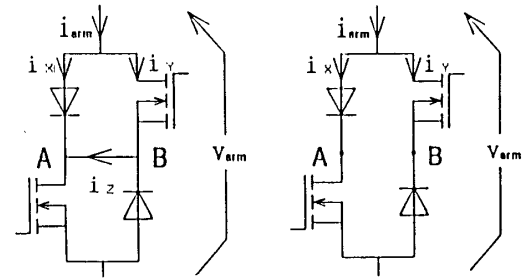
3.1 寄生要素に起因するスイッチングへの悪影響

前章の図2などでは、主デバイスとしてバイポーラトランジスタのシンボルを用いた。しかし、より高いスイッチング周波数を実現する目的でMOS-FETモジュールを利用する場合、前章で述べた理想的なソフトスイッチング動作はモジュールの寄生要素により大きく影響を受ける。

図7(a)はMOS-FETを用いた主回路構成であり、サイクロコンバータ段の双方向性スイッチングアーム(双方向の矢印)として、2通りの構成法が示されている。(b)改善前と(c)改善後の相違点は中点AおよびBが結線されているか否かである。



(a) Main circuit configuration



(b) Before improvement (c) After improvement

Fig.7 Bidirectional switch using MOS-FETs.

TABLE I Comparison of two power conversion stages in order to show the duality between them.

Power conversion stages	Primary stage	Secondary stage
Circuit topologies	Forced(self) commutated voltage source inverter	Naturally commutated cycloconverter
Switching devices	Self turn-off devices (BIRs, MOS-FETs, BSITs etc.).	Same as left
Equivalent models during commutation	Voltage source *	Current source *
Time constants of control signals	τ_d : Dead time setting to avoid short circuit	τ_o : Overlap period setting to avoid open circuit
Features of commutation	Reduced dv/dt due to loss-less capacitor snubber C	Reduced di/dt due to commutation overlap phenomena by leakage inductance L
Switching operation	ZVS (Zero voltage swithing)	ZCS (Zero current swithing)

* Seen from HF transformer side

TABLE II Classification of switching operation for each power conversion stage.

Stages	HF inverter		Cycloconv.
	Transistor : S	Diode : D	Arm : S _{au}
Switching "ON"	ZVS ZCS	ZVS	ZCS
Switching "OFF"	ZVS	ZVS ZCS	ZCS

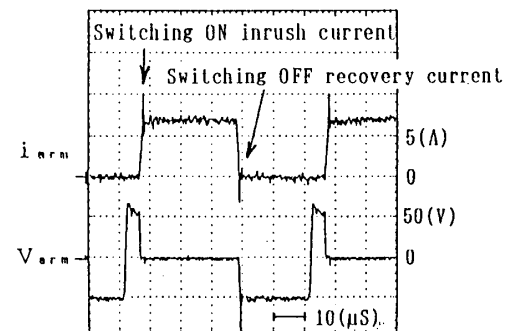


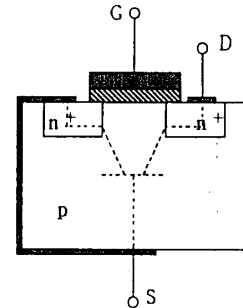
Fig.8 Waveforms at arm-S5.

点A, Bを結線したときのサイクロコンバータのアームS5の動作波形の一例を図8に示す。スイッチングオン時の突入電流とオフ時のリカバリ電流が観測される。図9はスイッチングオフ時の拡大波形である。アーム内の各部に流れる電流を観測した結果、点BからAに向かって流れる電流 i_z はMOS-FETモジュール自身にこれと逆並列に寄生して存在するダイオードを通して流れる。ただしこの寄生素子は図7には示されていない。

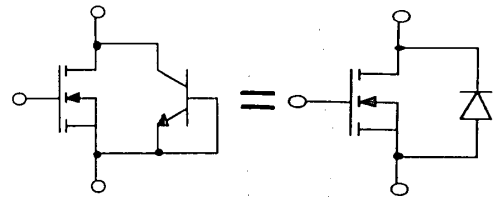
図10はMOS-FETモジュールのソース端子をサブストレートゲート端子と接続した一般的な構造とその等価回路を示している。ソースとドレイン間に存在する寄生ダイオードは、通常ファストリカバリタイプに比べてリカバリ特性の点で劣る。その結果、たとえばファストリカバリダイオードをモジュールの外付け素子としてMOS-FETと逆並列および直列に接続しても、内部寄生素子のリカバリ特性に起因してスイッチングオン、オフの瞬間にスパイク状の電流を生じることになる。

3.2 ZCSアーム構成の改善

上述の実験結果に基づいて、アームの midpoint AおよびBの間を開放し、寄生素子の電流を遮断した。スイッチングオフ時の改善後の波形を図11に示す。MOS-FETに直列に接続する外付けダイオードに



(a) Typical structure



(b) Equivalent circuit

Fig.10 Effect of parasitic diode on MOS-FET module when its source and substrate gate are connected for use.

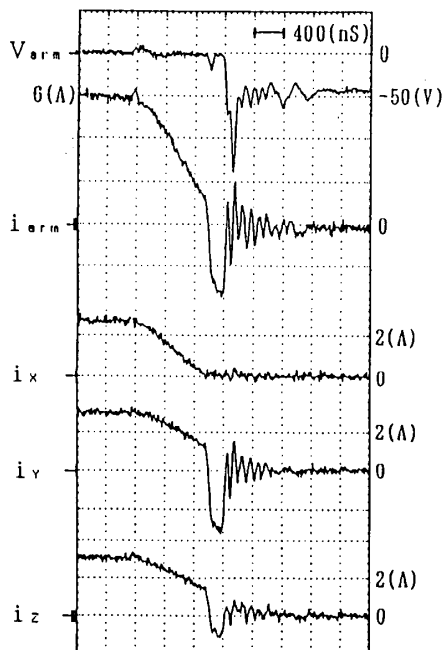


Fig.9 Waveforms at turning-OFF.

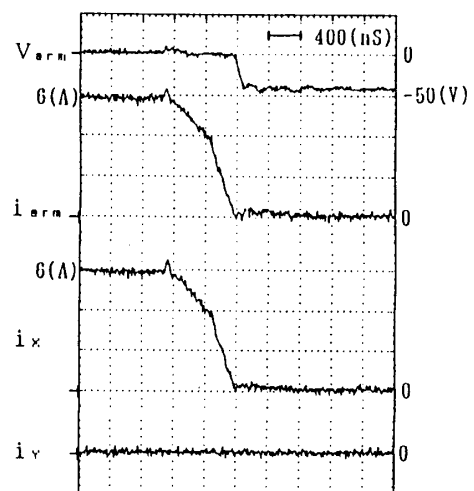


Fig.11 Improved waveforms at turning-OFF.

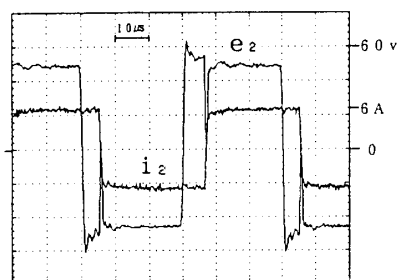
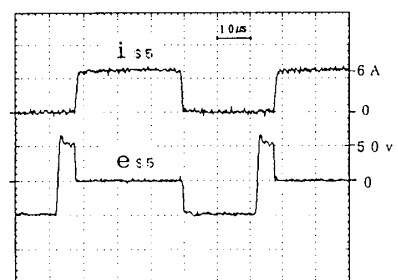
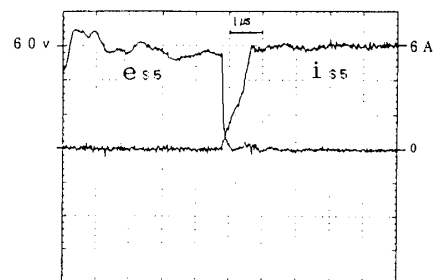
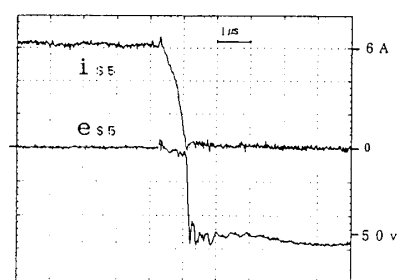
(a) Transformer voltage and current, e_2 and i_2 (b) Voltage and current at ZCS arm-S5, e_{S5} and i_{S5}

Fig.12 Waveforms on the secondary side of transformer.



(a) Switching-on transient



(b) Switching-off transient

Fig.13 Expanded per arm waveforms at ZCS arm-S5.

はファストリカバリかつソフトリカバリ特性を有するデバイスを用いたため、アームのリカバリ電流や電圧のはね上がりはほとんど観測されておらず良好な改善効果が認められる。

4. 総合的なスイッチング特性の実験結果

総合的なスイッチング動作を確認するため、一定のDC負荷の下での各部動作波形の観測を行った。

4.1 サイクロコンバータ段でのZCS動作

図12(a)に2次側サイクロコンバータ段での動作波形を示す。また図12(b)はこの時の1アームについての電流、電圧波形であるが、サージ電圧、突入電流のいずれも認められない。図13は、スイッチングオンおよびオフ時の拡大波形である。電圧、電流の波形の重なりはほとんど見られず、このことからスイッチング損失の低減が認められる。アームS5の電圧-電流平面上でのスイッチング軌跡を図14に示す。ここで電流極性が正のみに限られているのは、ここでの負荷がDC負荷であるためである。軌跡が座標軸に沿って観測されることから、ソフトスイッチングが実現されていることがわかる。

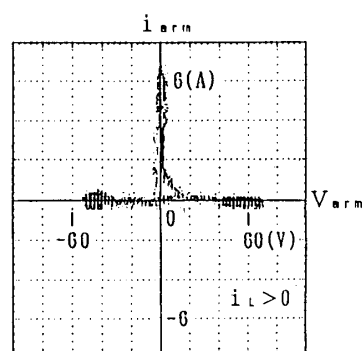


Fig.14 Switching trajectory of ZCS cyclo. arm-S5.

4.2 インバータ段でのZVS動作

図15(a)に1次側のインバータ段での動作波形を示す。また、図15(b)にこの時の1アームについての電流、電圧波形を、図16にスイッチング時の拡大波形を示す。アーム電圧の時間変化率 dv/dt はよく抑制されており、その結果スイッチング損失も抑制されていることがわかる。図17はアームS1のスイッチング軌跡である。電圧の極性が正のみであるのは、回路構成が電圧形のためである。ここでも先と同様

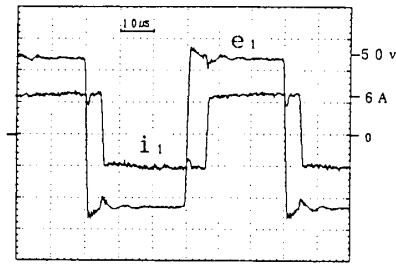
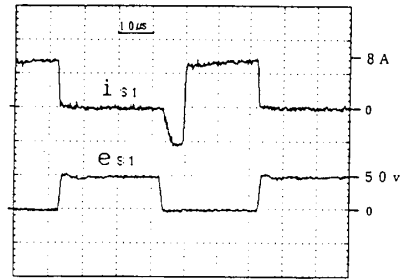
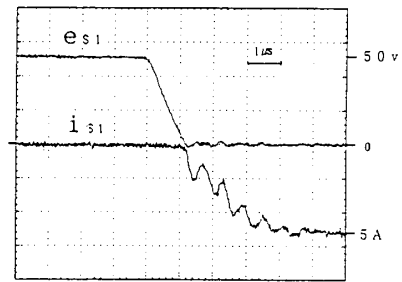
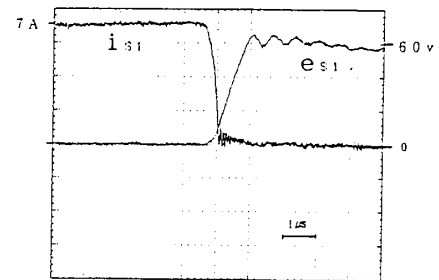
(a) Transformer voltage and current, e_1 and i_1 (b) Voltage and current at ZVS arm-S1, e_{S1} and i_{S1}

Fig.15 Waveforms on the primary side of transformer.



(a) Switching-on transient



(b) Switching-off transient

Fig.16 Expanded per arm waveforms at ZVS arm-S1.

に良好なソフトスイッチング特性が観測できる。図14および図17により、非共振形のままで完全ソフトスイッチング化を実現できることが裏付けられた。

5. 結論

筆者らの知る限り、これまでにサイクロコンバータ方式DC/ACコンバータに不可欠な双方向性スイッチの構成法に関する議論はなされた例がなく、もっぱら図7の点AとBを結線した構成が採用されてきたように思う。しかしながら、本論文では、その構成法が筆者らの提案する制御方式で運転されるHFリンクコンバータのソフトスイッチング特性に大きな悪影響を与えることを指摘し、その解決策を示した。本稿の要点を以下にまとめる。

(1) 筆者らが既に提案しているサイクロコンバータ方式のHFリンクコンバータの新制御法の基本原理と特徴を新たに双対性の観点から説明した。

a) 2次側サイクロコンバータ段では通常一般的であるハードスイッチング(デバイス転流)によるPWMの代わりに、自然転流による位相制御のみを用いることにより、ZCSモードで動作させることができる。

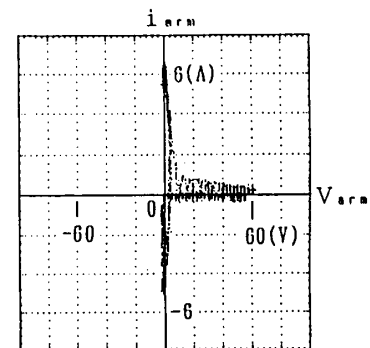


Fig.17 Switching trajectory of ZVS VSI arm-S1.

b) この結果、1次側インバータ段に対しては2次側負荷が常に遅れ電流を要求することになるため、インバータの主デバイスに並列にロスレススナバキャパシタを付加することにより、ZVSモードで動作させることができる。

c) 2次側での転流重なり現象、および1次側でのロスレススナバキャパシタ動作は、原理的に互いに双対の関係にあり、これら2現象の組合せが非共振形HFリンクコンバータの完全ソフトスイッチング化を可能としている。

(2) 実験的な考察を経ることにより、MOS-FETを用いてZCS双方向性スイッチングアームを構成する上で適した回路方式を明らかにした。

a) ソースをサブストレートゲート端子に接続したMOS-FETモジュールを用いる場合には、ソース、ドレイン間の寄生ダイオードによりソフトスイッチング特性が悪化する。

b) この解決策としては、図7のアーム内の点A、Bを開放し、寄生ダイオードを経由して流れる電流を遮断する方法が極めて有効である。

本稿では、動作原理の説明に主眼を置いたため、主回路としては最も基本的な単相出力を、また位相制御の方式としても最も基本的な対称ゲート制御を前提とした。しかし、本方式は3相出力にも容易に拡張でき、また非対称ゲート制御法を適用することにより、HF側での力率改善が図れ、結果的に電力変換効率の向上も見込める。これらの点については現在研究を進めているところである。

本論文は、平成8年度科学研究費補助金基盤研究(C)および(株)三英社製作所による委託研究の成果の一部をまとめたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] For example, D.M.Divan, "The resonant DC link converter - a new concept in static power conversion", IEEE IAS'86 Annual Meeting Conf. Rec., p.648, 1986
- [2] W.McMurray, "Resonant snubbers with auxiliary switches", IEEE IAS'89 Annual Meeting Conf. Rec., p.829, 1989
- [3] R.W.DeDoncker et al., "The auxiliary resonant commutated pole converter", IEEE IAS'90 Annual Meeting, Conf. Rec., p.1229, 1990
- [4] M.Matsui et al., "High frequency link DC/AC converter with suppressed snubber circuits - Naturally commutated phase angle control with self turn-off devices-", IEEE IAS'93 Annual Meeting, Conf. Rec., p.827, 1993 / IEEE Trans. on IA, Vol.IA-32, No.2, p.293, 1996
- [5] M.Matsui et al., "High frequency link non-resonant type soft switching converter", IEE/Japan IPEC-Yokohama'95, Conf. Rec., p.1542, 1995
- [6] M.Matsui, "Soft-switched non-resonant type HF link converter and its applications", KIEE ICPE'95-Seoul, Proceedings, p.374, 1995
- [7] 山上、中村、松井「非共振形高周波リンクソフトスイッチングコンバータの非対称制御法」平成8年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 Vol.1, No.54, p.147, 1996